$^{12}C+^{12}C$ 熔合反应天体物理 S^*因子的研究现状

南威克[1]，王友宝[1,†]，谌阳平[1]，李云居[1]，郭冰[1]，柳卫平[1,2,†]

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京　102413;
南方科技大学物理系, 深圳　518055)

摘要: 近二十年来，中子星表面由 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应触发的超级 X-射线暴天文观测结果，无法用现有的基于外推得到的 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应率解释,因此对极低库仑势垒能量下 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应截面进行测量成为了核天体物理研究的一个热点。然而，超级暴典型的 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应伽莫夫窗口为 1.5 ± 0.3 MeV，远低于熔合反应库仑势垒。这使得用直接测量方法对该能区内极低的熔合反应截面进行研究成为一个巨大的挑战。特洛伊木马方法实验(THM)是目前唯一一家给出伽莫夫窗口内各出射道激发函数的带电粒子测量实验，然而其结果目前仍存在很大争议。本工作回顾了 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应直接测量实验的研究现状，并对 THM 的数据分析结果进行进一步解读。结合全同玻色子体系理论对 THM 提取的复合核 ^{24}Mg 激发态进行讨论，给出 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应在伽莫夫窗口内的天体物理 S^* 因子，并推荐对应能区 $^{12}C+^{12}C$ 入射道无量纲约化宽度平均值为 θ^2=0.031。

关键词:　核天体物理；$^{12}C+^{12}C$ 熔合反应；特洛伊木马方法；天体物理 S^* 因子

中图分类号:　O571.1　　**文献标志码:**　A　　**doi:**

1　引言：超级暴与 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应

1.1　宇宙中的超级暴

X 射线暴(X-ray bursts)是在中子星表面发生的不稳定的热核反应，导致剧烈的能量释放和极亮的 X 射线辐射。这种爆发通常发生在由中子星与恒星组成的双星系统中。在这种系统中，物质从伴星流向中子星形成一个吸积盘。当吸积盘中的物质积累到一定程度时，核反应开始点燃释放大量的能量，产生持续几秒

收稿日期: 2024-05-27; **修改日期:** 2024-mm-dd
基金项目: 国家重点研发项目 (No. 2022YFA1602301)；国家自然科学基金 (Nos. U2267205, 12275361)；
作者简介: 南威克(1995—), 男(汉), 浙江乐清人, 在读博士, 从事核天体物理研究；E-mail: nanweike_2024@163.com
† **通信作者:** 王友宝；　E-mail: ybwang@ciae.ac.cn
柳卫平；　E-mail: liuwp@sustech.edu.cn

到几分钟的强烈 X 射线辐射。而持续数小时至一天的超级暴发被称为“超级暴”(superbursts)。超级暴的能量释放和特征观测有助于科学家们了解中子星的性质以及双星系统中的物质流动和相互作用。

中子星的质量吸积率 M 决定了不同的点火条件。由于压缩产生的加热程度与吸积率成正比，因此较大的吸积率会导致更高的温度。此外，稳态燃烧要求燃料的消耗速度与其吸积速率相匹配[1]。为了维持稳定燃烧，中子星包层内的温度分布会调整以维持这种平衡。随着吸积盘中物质的不断积累，深度 y 与温度 T 的对应关系不断发生变化，并在对应的条件下发生氢、氦和碳的燃烧。在约为 0.1 个爱丁顿极限的狭窄范围内，由氢燃烧产生的加热条件使得氦在达到碳点火条件之前能够稳定燃烧[2]。这种稳定的氢和氦燃烧过程产生了富含碳的灰烬，这些灰烬可能在达到碳点火条件时点燃并产生超级暴。

超级暴一般被认为是由中子星表面快速质子俘获过程残留物中不稳定的 ^{12}C 燃烧引发的[3]。尽管超级暴的观测数据很少，但 ^{12}C+^{12}C 熔合反应截面对于建模这些系统至关重要。根据目前采用的 ^{12}C+^{12}C 熔合反应速率，超级暴模型无法解释天文观测的中子星表面异常深度处的超级暴事件[4]。 比如 4U 1608-522 超级暴事件，在推导出的沉积深度上，当前的超级暴理论预测，在爆发期间壳层温度不会升至超级暴点燃所需的值。因此，目前一般认为 ^{12}C+^{12}C 熔合反应在 $E_{c.m.}\approx$1.5 MeV 处存在强烈的共振，这将使得预测的碳点火温度和深度与观测可以达到一致[5]。

1.2 ^{12}C+^{12}C 熔合反应的研究现状

由于在各种恒星燃烧场景中起着关键作用，极低库仑势垒能区内的 ^{12}C+^{12}C 熔合反应在近 60 多年来一直是核天体物理的研究热点。对于 ^{12}C+^{12}C 体系，由于其库仑势垒约为 7.5 MeV，远高于伽莫夫窗口能区，所以 ^{12}C+^{12}C 熔合反应截面随能量下降而急剧下降。这使得在伽莫夫能区内对 ^{12}C+^{12}C 熔合反应截面进行直接测量极其困难。现有直接测量实验将能量推进到 $E_{c.m.}$约 2.1 MeV，得到的天体物理 S^*因子存在很大的测量误差。不少实验表明 ^{12}C+^{12}C 熔合反应随能量下降出现 S^* 因子的反常增益现象[6-9]，比如一些发表的测量结果报导了 2.14 MeV 处的强烈共振[8]，但是目前对该反应在伽莫夫能区内的共振信息仍然缺乏了解，甚至不同理论模型预言的趋势也大相径庭。

使用带电粒子[7, 10-12]、γ 谱学[6, 8, 13, 14]以及带电粒子-γ 谱学符合[9, 15, 16]方法对 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应进行直接测量是目前最可靠的研究方法。如表 1 所见，近 60 年来针对 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应已经进行了大量的直接测量工作。早期比较有代表性的是 Mazarakis 等人[7]与 Becker 等人[11]的带电粒子直接测量实验。最先 Mazarakis 等人发现在质心系能量小于 3 MeV 时，出射道 S^* 因子会随能量下降而出现提升。这种熔合反应低能区 S^*因子明显超出无共振高能外推的结果，被称为 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应的低能反常增益现象[7]。另一方面，尽管早期的 γ 谱学研究[6]也支持 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应低能反常增益现象的存在，但是后续 Kettner 等人更加细致全面的 γ 谱学研究表明 $E_{c.m.}$在 2.7 – 3.8 MeV 的能量范围内 S_{440} 并没有表现出强烈的增益[17]。直到

1981 年，Becker 等人[11]讨论了石墨靶中 D 杂质会产生束流诱发本底，因此单纯的带电粒子谱学测量无法向低能区推进。Becker 等人给出了 2.8 MeV - 6.1 MeV 的各出射道 S^*因子，并未发现 S^*因子反常增益现象，这使得 S^*因子在极低库仑势垒能区是否存在反常增益现象颇有争议。γ 谱学研究 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应存在天然的局限性。一方面，由于 p_0 和 α_0 道不产生 γ 射线，因此无法在实验中对基态出射道进行直接测量，只能依赖其他实验提供的分支比信息进行基态修正。另一方面，由于多普勒效应的影响，特别是 α 出射道，实验测得的剩余核特征 γ 峰存在很大的展宽[8]，效应本底比的下降使得极低截面的 γ 谱学研究异常困难。

表 1　　近 60 年来的 ^{12}C+^{12}C 熔合反应直接测量工作

测量方法	参考文献	能量范围/MeV
带电粒子	Parterson (1969)[10]	3.23 - 8.75
带电粒子	Mazarakis (1973)[7]	2.45 - 5
带电粒子	Becker (1981)[11]	2.8 - 6.3
带电粒子	Zickfoose (2018)[12]	2.00 - 4.00
γ 谱学	High (1977)[6]	2.46 - 5.88
γ 谱学	Kettner (1977)[17]	2.5 - 6.2
γ 谱学	Rrb (1980)[18]	5.6 - 10
γ 谱学	Dasmahapatra (1982)[19]	4.5 - 6.0
γ 谱学	Aguilera (2006)[13]	4.42 - 6.48
γ 谱学	Palos (2006)[14]	2.25 - 6.01
γ 谱学	Spillane (2007)[8]	2.10 - 4.75
带电粒子- γ 谱学符合	Jiang (2018)[15]	3.5 - 4.0
带电粒子- γ 谱学符合	Fruet (2020)[9]	2.1 - 5.5
带电粒子- γ 谱学符合	Tan (2020)[16]	2.2 - 5.5

近年来，带电粒子 - γ 谱学符合测量技术被应用于 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应研究，成为现阶段对该反应进行直接测量的主要研究方法。使用带电粒子- γ 谱学符合[9]方法在实验测量时对目标事件进行筛选，能够有效地降低靶物质中杂质的束流诱发本底[9]。但是探测效率明显降低导致的统计误差和宇宙线本底成为 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应直接测量的主要困难，因此目前依然无法将直接测量能量推进到伽莫夫能区。以谭万鹏等人[16]和 Fruet 等人[9]的带电粒子- γ 谱学符合测量实验为例，两者使用大致相同的探测器设置对相同能区的 ^{12}C+^{12}C 熔合反应截面进行了测量。然而两者在 2.5 MeV 附近的 S^*因子测量结果差异达到近 7 倍，更低能点的测量必然面临更大的挑战。

在天体环境下，^{12}C+^{12}C 熔合反应率主要由 $^{12}C(^{12}C, p)^{23}Na$, $^{12}C(^{12}C, \alpha)^{20}Ne$, 以及 $^{12}C(^{12}C, n)^{23}Mg$ 所决定。其中，中子出射道是吸能反应，因此其贡献远低于质子出射道和 α 出射道[20]。如图 1 所示，伽莫夫窗口内复合核 ^{24}Mg 的激发能在 15.5 MeV 附近。在现有的实验条件下，难以通过 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应直接布居到该激发能区的 ^{24}Mg 激发态并对其各出射道进行精确测量。2018 年，Tumino 等人使用特洛伊木马方法首次对 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应在伽莫夫窗口能区进行实验研究[21]，给出了四个出射道 p_0，p_1，α_0，α_1 的激发函数。

THM 实验提取的 ^{24}Mg 一系列共振参数，是 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应在伽莫夫能区存在强烈共振的直接证据。另一方面，Tumino 等人采用平面波准自由粒子近似(PWA)忽略了 THM 反应出射道和入射道中的强库仑相互作用[22]。考虑库仑相互作用后采用扭曲波玻恩近似(DWBA)给出的 S^*因子和 PWA 的结果在趋势上截然相反[23]，这意味着木马核 ^{14}N 中的旁观者 d 核在复合核形成和衰变过程中起着不可忽略的作用。经过库仑修正给出的 S^*因子比原值大幅降低，在伽莫夫能区远低于推荐平均值[24]。

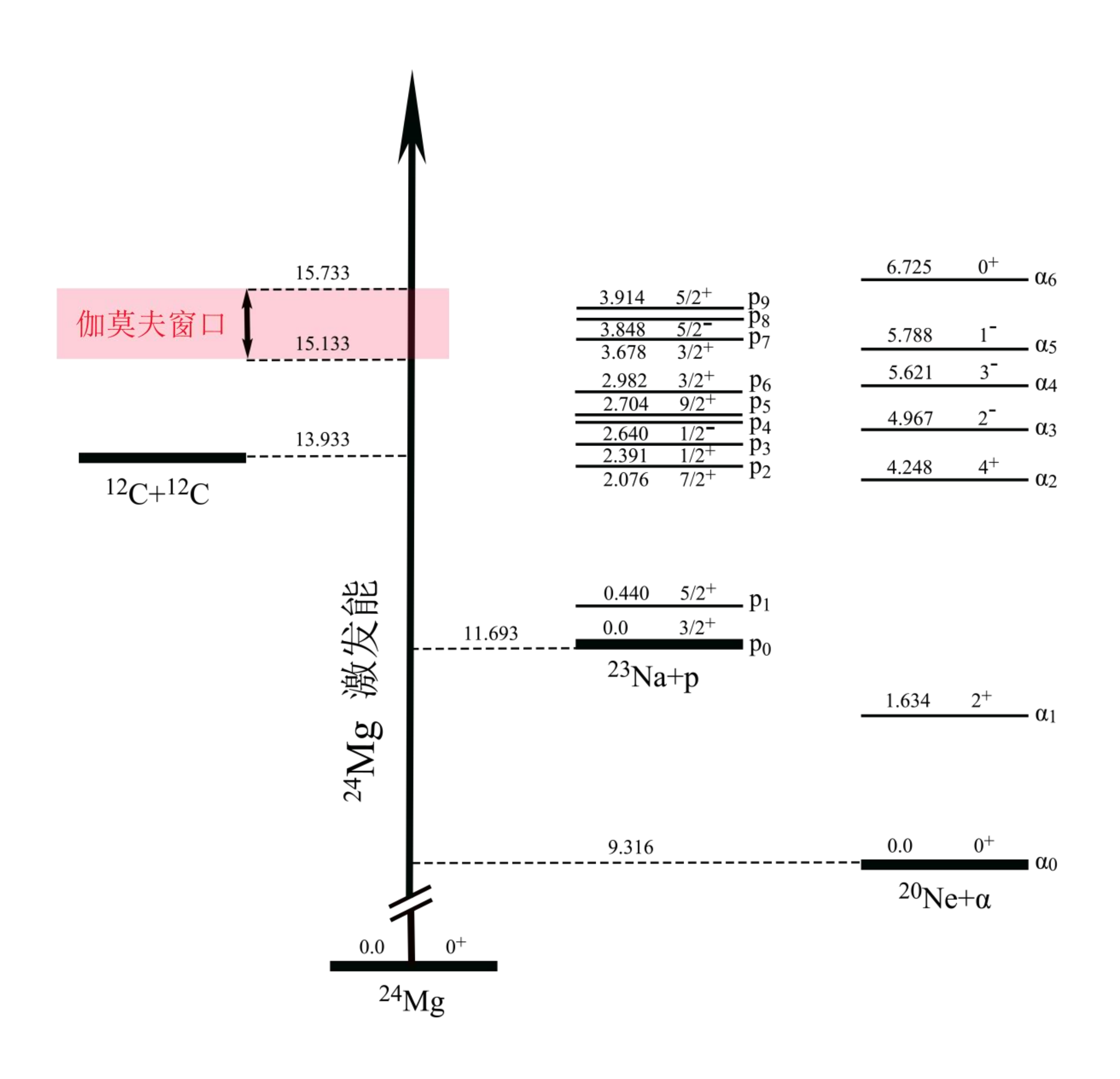


图 1 ^{12}C+^{12}C 熔合反应涉及的反应道

最近 Taniguchi 等人[25]使用无可调参数的反对称分子动力学模型(AMD)对 ^{12}C+^{12}C 熔合反应在伽莫夫窗口的 ^{24}Mg 共振态进行计算，给出了若干个 0^+和 2^+的共振能级。AMD 的计算结果与直接测量数据在量级上一致，但是在伽莫夫窗口能区比推荐平均值[24]大约低了 4 倍，没有表现出明显的 S^*因子反常增益现象。有

趣的是，AMD 理论计算与 THM 实验给出的共振能级位置比较接近。总的来说尽管 THM 实验的分析方法和结果目前仍存在很大争议，但是其给出的 ^{24}Mg 出射道信息是值得参考的。

2 $^{12}C+^{12}C$ 体系的共振能级性质

全同玻色子是指在量子力学中，不可区分并遵循玻色-爱因斯坦统计的粒子。常见的玻色子包括光子、胶子以及某些原子和分子。在核物理中质子和中子都是费米子，由偶数个质子和中子组成的原子核可以看成玻色子，比如 α 粒子和基态 ^{12}C。由奇数或偶数个玻色子组成的粒子总是玻色子，比如 ^{8}Be 的 2α, ^{12}C 的 3α 共振态。通过玻色子模型描述这些激发态，可以更好的理解核内部的集体运动和相互作用。

^{12}C 基态的自旋宇称是 0^+，可以看成由 6 个质子和 6 个中子组成的玻色子。$^{12}C+^{12}C$ 反应道因此可以被看为是两个全同玻色子系统，只能布居 ^{24}Mg 偶自旋正宇称共振态，即 0^+，2^+，4^+等。对 $E_{c.m.}$大于 4 MeV 的 $^{12}C + ^{12}C$ 熔合反应已有不少实验数据[13, 26]，认为 2^+态占主要贡献[26]。THM 方法对 ^{24}Mg 的四个出射道进行 R-矩阵拟合给出了大量共振能级参数，其中包含了不少 $^{12}C+^{12}C$ 全同玻色子体系无法布居的负宇称态，比如 1^-，3^-等，这些 1^-，3^-等共振态可能是木马核中的旁观者 d 核参与反应过程所导致的。

$^{12}C+^{12}C$ 熔合反应高能点数据表明 2^+态起主要贡献，随着能量下降，在伽莫夫能区 6^+，8^+等在 $^{12}C+^{12}C$ 全同玻色子体系中占比不到 1 %[27]。因此可以从 THM 提供的 ^{24}Mg 0^+，2^+ ，4^+ 共振参数出发对 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应在伽莫夫能区内的 S^*因子趋势进行进一步的分析。

3 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应在伽莫夫能区的 S^* 因子计算

$^{12}C+^{12}C$ 熔合反应单个共振的反应截面可以由 Breit-Wigner 公式给出，见公式(5)。S^*因子由公式(6)给出。

$$\sigma(E) = \frac{\pi\hbar^2(2J+1)}{\mu E}\frac{\Gamma_{in}\Gamma_{out}}{(E-E_R)^2+\frac{\Gamma^2}{4}} \tag{5}$$

$$S^*(E) = E\sigma(E)exp(2\pi\eta + 0.46MeV^{-1}E) \tag{6}$$

公式 (5) 中 $\hbar$ 是约化普朗克常数，J 为复合核 ^{24}Mg 共振能级的总角动量，Γ_{in} 和 Γ_{out} 分别代表复合核反应的入射道粒子宽度与出射道粒子宽度，E_R 是共振能量，Γ为总宽度。公式(6)中 η 为索末菲参数，定义为 $\eta = {}^{36}/_{137}\sqrt{{}^{\mu c^2}/_{2E}}$。在伽莫夫能区入射道粒子宽度远低于出射道粒子宽度，因此由公式(5)可知入射道粒子宽度很大程度上决定了熔合反应激发函数的幅度，而出射道粒子宽度则包含了 ^{24}Mg 核结构方面的信息。

THM 是相对测量，需要利用直接测量的高能点数据进行归一。对于 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应出射道 p_0，p_1，α_0，α_1，S^*因子计算时使用 THM 给出的 0^+，2^+，4^+共振能级参数，见表 2。对于入射道，考虑到 Spillane

等人[8]的 S^*因子数据在 2.45 MeV 附近达到极大值，并且该能点相对误差较小，因此 S^*因子与直接测量数据在 $E_{c.m.}$ = 2.45 MeV 处进行归一，对应的入射道无量纲约化宽度 θ^2 = 0.031±0.027，计算时 $^{12}C+^{12}C$ 入射道道半径为 6 fm [25]。无量纲约化宽度 θ^2代表入射道约化宽度γ^2与 Wigner 极限γ_W^2的比值[28,29]，见公式(7)和公式(8)。 θ^2误差主要来源于 2.45 MeV 附近 Spillane 等人给出的数据点误差。

$$\gamma_W^2 = \frac{3\hbar^2}{2\mu a^2} \tag{7}$$

$$\theta^2 = \frac{\gamma^2}{\gamma_W^2} \tag{8}$$

采用 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应在 2.45 MeV 处的入射道无量纲约化宽度，分别对不同共振组分在 $E_{c.m.}$<2.45 MeV 的 S^*因子贡献进行计算，再将独立共振的 S^*因子贡献进行求和，即得到 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应在相关能区的总 S^*因子，见图 2 中的黑线。从图 2 上可以看出 THM 方法给出的 S^*因子在 2 MeV 附近，与直接测量数据比较接近，随着能量下降，低能区则远大于由高能点外推得到的推荐平均值[24]，见图 2 中的 CF88；AMD 理论计算和 DWBA 修正 THM 给出的 S^*因子，在伽莫夫能区(1.5 ± 0.3 MeV)，也明显低于推荐平均值，我们给出的结果则与推荐平均值较为接近。

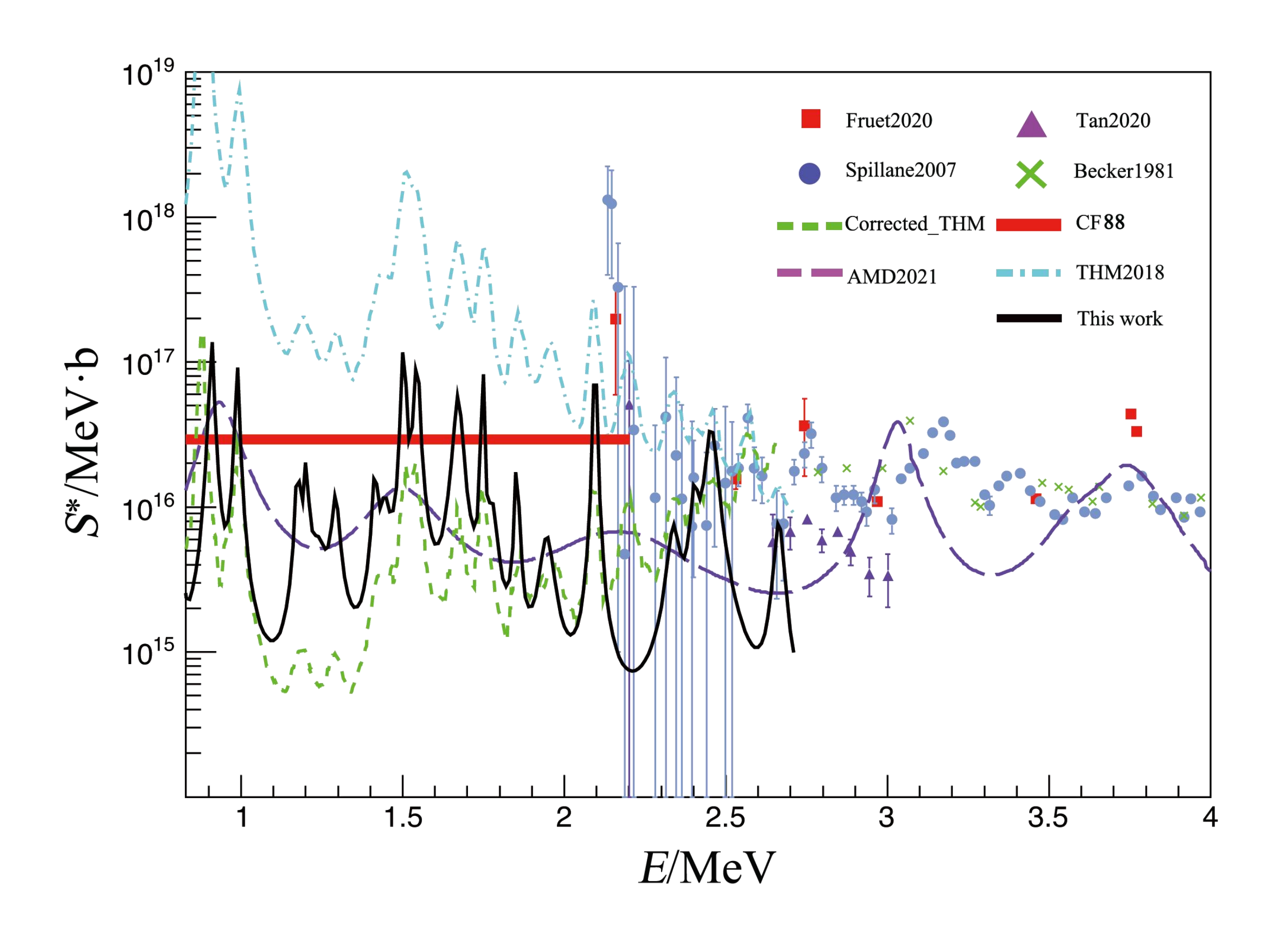


图 2 $^{12}C+^{12}C$ 熔合反应的天体物理 S^*因子

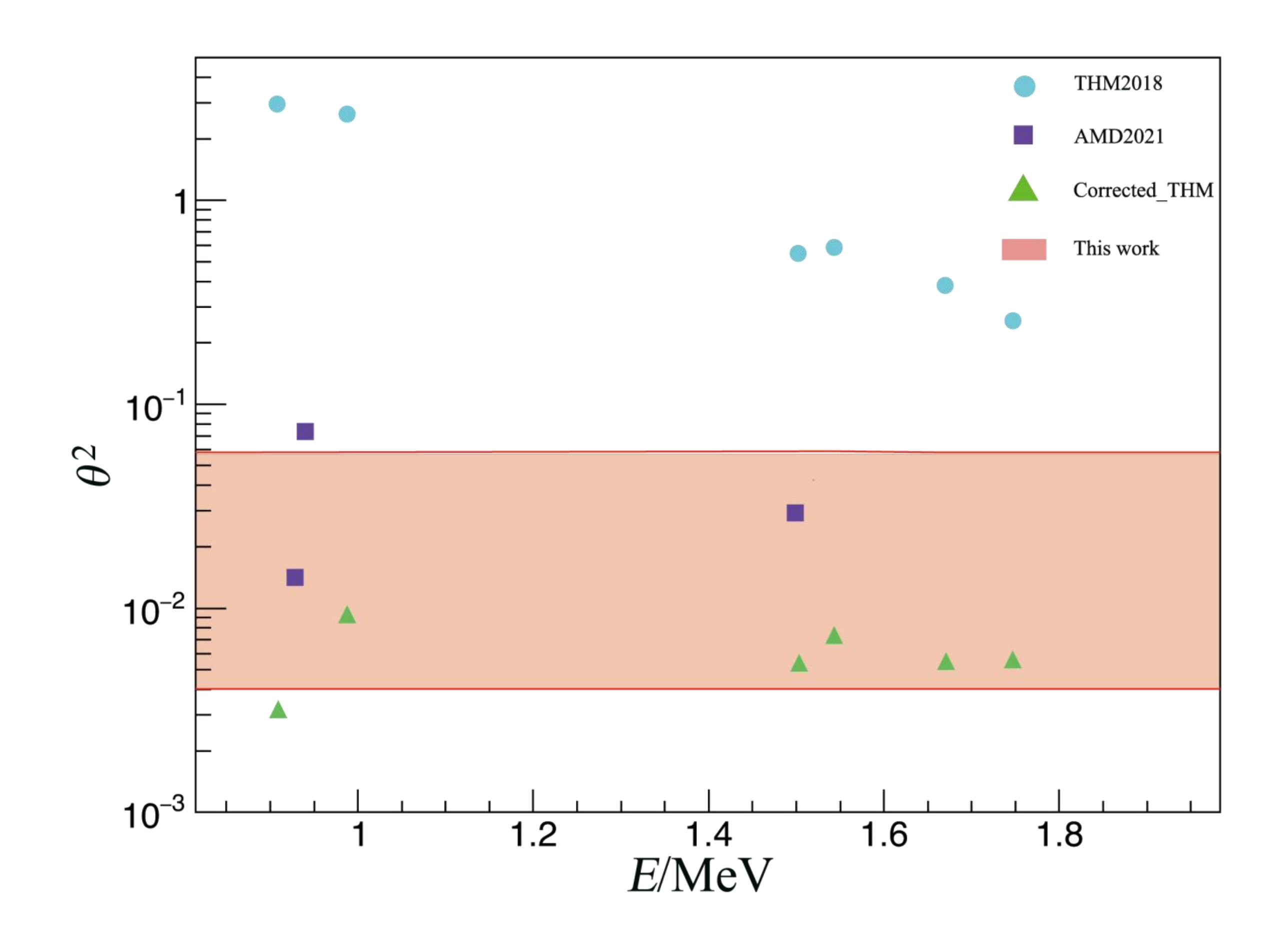


图 3 ^{12}C+^{12}C 熔合反应伽莫夫能区入射道无量纲约化宽度

在极低库仑势垒能区，^{12}C+^{12}C 熔合反应的 S^*因子与入射道约化宽度成正比。因此入射道约化宽度是一个非常重要的物理量，但很难通过间接测量确定。我们将各理论与实验测量给出的 S^*因子，与本工作相比较，以便探讨入射道约化宽度的可能取值。在伽莫夫窗口内，THM，DWBA 修正 THM，AMD 模型以及本工作推荐的 ^{12}C+^{12}C 熔合反应的入射道 θ^2见图 3。随着能量下降，THM 给出的入射道无量纲约化宽度成上升趋势。事实上，在 $E_{\mathrm{c.m.}}$约 1 MeV 时，θ^2甚至超过了 1，这是难于理解的。我们的结果中心值与 AMD 理论计算值基本一致。

4　结论与展望

^{12}C + ^{12}C 熔合反应由于其核结构独特性以及在星体演化中的关键作用，近六十年来一直被核天体物理学界广泛关注。尽管在极低库仑势垒能区对其进行了许多理论和实验的研究，但是该反应在伽莫夫窗口的反应截面尚不清楚，不同理论模型对其 S^*因子的趋势预言也大相径庭。本工作探讨了 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应的共振特点，并比较了包含 THM 在内的多家工作在伽莫夫窗口内给出的 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应入射道 θ^2。结合高能点直接测量数据，使用 THM 的出射道 0^+，2^+，4^+共振参数，给出了 ^{12}C + ^{12}C 熔合反应在伽莫夫能区的天体物理 S^*因子。本工作首次给出了 ^{12}C + ^{12}C 入射道在伽莫夫窗口能区的平均无量纲约化宽度推荐值，

其中心值与 AMD 模型在相关能区的理论计算结果相一致。

附录 A

表 2　　$^{12}C+^{12}C$ 熔合反应 S^*因子计算相关参数[21]

$E_{c.m.}$/MeV	J^{π}	$\Gamma_{\alpha0}$/keV	$\Gamma_{\alpha1}$/keV	Γ_{p0}/keV	Γ_{p1}/keV
2.664	4+	10.7	0.9	1.1	16.6
2.455	2+	15.1	0.31	4.1	18
2.403	4+	4.6	0.7	1.7	15.4
2.338	4+	13.6	3.5	4.6	16.2
2.095	2+	1.1	1.0	3.4	1.7
1.946	4+	4.0	3.6	27.4	8.4
1.853	4+	2.4	1.3	3.8	5.2
1.777	4+	9.0	0.45	8.0	13.1
1.747	0+	0.38	0.1	1.0	3.3
1.671	2+	6.3	1.9	7.7	13.1
1.544	2+	1.0	0.07	3.5	12.5
1.503	2+	1.7	0.7	4.6	5.7
1.445	4+	10.4	2.2	5.2	14.0
1.414	4+	8.0	0.1	2.3	6.2
1.293	4+	0.6	0.9	16	7.6
1.239	4+	28.1	7.0	5.1	20.6
1.201	4+	0.5	0.3	2.0	12.9
1.175	4+	1.6	2.8	5.6	6.7
0.988	0+	2.1	0.4	2.5	7.9
0.909	2+	2.1	1.4	7.8	3.6
0.805	4+	2.2	3.6	2.7	0.11

参考文献（References）

[1]　GALLOWAY D K, KEEK L. Germany, Springer Berlin Heidelberg Press, 2020: 209-262. doi: 10.1007/978-3-662-62110-3_5

[2]　KEEK L, HEGER A. Monthly Notics of the Royal Astronomical Society: Letters, 2016, 456: L11－L15. doi: 10.1093/mnrasl/slv167

[3]　TANG X D, ESBENSEN H, FANG X, *et al*. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 381: 012120. doi: 10.1088/1742-6596/381/1/012120

[4]　IN ‘T ZAND J J M, KEEK L, CUMMING A, *et al*. Astronomy & Astrophysics, 2009, 497: 469-480. doi: 10.1051/0004-6361/200811432

[5]　COOPER R L, STEINER A W, BROWN E F. The Astrophysical Journal, 2009, 702: 660. doi: 10.1088/0004-637X/702/1/660

[6]　HIGH M D, CUJEC B. Nuclear Physics A, 1977, 282: 181-188. doi: 10.1016/0375-9474(77)90179-8

[7]　MAZARAKIS M G, STEPHENS W E. Physical Review C, 1973, 7: 1280. doi: 10.1103/PhysRevC.7.1280

[8] SPILLANE T, RAIOLA F, ROLFS C, *et al*. Physical Review Letters, 2007, 98: 122501. doi: 10.1103/PhysRevLett.98.122501

[9] FRUET G, COURTIN S, Heine M, *et al*. Physical Review Letters, 2020, 124: 192701. doi: 10.1103/PhysRevLett.124.192701

[10] PATTERSON J R, WINKLER H, ZAIDINS C S. The Astrophysical Journal, 1969, 157: 367. doi: 10.1086/150073

[11] BECKER H W, KETTNER K U, ROLFS C, *et al*. Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei, 1981, 303: 305-312. doi: 10.1007/BF01421528

[12] ZICKEFOOSE J, LEVA A D, STRIEDER F, *et al*. Physical Review C, 2018, 97: 065806. doi: 10.1103/PhysRevC.97.065806

[13] AGUILERA E F, ROSALES P, MARTINEZ-QUIROZ E, *et al*. Physical Review C, 2006, 73: 064601. doi: 10.1103/PhysRevC.73.064601

[14] BARRÓN-PALOS L, AGUILERA E F, ASPIAZU J, *et al*. Nuclear Physics A, 2006, 779: 318. doi: 10.1016/j.nuclphysa.2006.09.004

[15] JIANG C L, SANTIAGO-GONZALEZ D, ALMARAZ-CALDERON S, *et al.* Physical Review C, 2018, 97: 012801. doi: 10.1103/PhysRevC.97.012801

[16] TAN W P, BOELTZIG A, DULAL C, *et al*. Physical Review Letters, 2020, 124: 192702. doi: 10.1103/PhysRevLett.124.192702

[17] KETTNER K U, LORENZ-WIRZBA H, ROLF C, *et al*. Physical Review Letters, 1977, 38: 337. doi: 10.1103/PhysRevLett.38.337

[18] ERB K A, BETTS R R, KOROTKY, *et al*. Physical Review C, 1980, 22: 507. doi: 10.1103/PhysRevC.22.507

[19] DASMAHAPATRA B, CUJEC B, LAHLOU F. Lettere al Nuovo Cimento, 1982, 35: 345-351. doi: 10.1007/BF02754703

[20] BUCHER B, TANG X D, FANG X, *et al*. Physical Review Letters, 2015, 114: 251102 . doi: 10.1103/PhysRevLett.114.251102

[21] TUMINO A, SPITALERI C, COGNATA M L, *et al*. Nature, 2018, 557: 687-690. doi: 10.1038/s41586-018-0149-4

[22] BECK C, MUKHAMEDZHANOV A M, TANG X D. The European Physical Journal A, 2020, 56: 87. doi: 10.1140/epja/s10050-020-00075-2

[23] MUKHAMEDZHANOV A M, PANG D Y, KADYROV. Physical Review C, 2019, 99: 064618. doi: 10.1103/PhysRevC.99.064618

[24] CAUGHLAN G R., FOWLER W A. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1988, 40: 1. doi: 10.1016/0092-640X(88)90009-5

[25] TANIGUCHI Y, KIMURA M. Physics Letters B, 2021, 823: 136790. doi: 10.1016/j.physletb.2021.136790

[26] CALSTER W, TREU W, DUCK P, *et al*. Physical Review C, 1977, 15: 950. doi: 10.1103/PhysRevC.15.950

[27] LI Y J, FANG X, BUCHER B, *et al*. Chinese Physics C, 2020, 44: 115001. doi: 10.1088/1674-1137/abae56

[28] KANADA-EN'YO Y, SUHARA T, TANIGUCHI Y. Progress of Theoretical Experimental Physics. 2014: 073D02. doi: 10.1093/ptep/ptu095

[29] DOVER C B, MAHAUX C, WEIDENMÜLLER H A. Nuclear Physics A, 1969, 139: 593-604. doi: 10.1016/0375-9474(69)90281-4

The current status of astrophysical S^*-factor studies for the $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction.

NAN Weike[1], WANG Youbao[1,†], SHEN Yangping[1], LI Yunju[1], GUO Bing[1], LIU Weiping[1,2,†]

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

2. Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Over the past two decades, astronomical observations of superbursts, initiated by the $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction on the surfaces of neutron stars, have remained elusive by theoretical models based on the reaction rate of $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction. Consequently, direct measurements for the cross section of the $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction at energies well below Coulomb barriers have become a hot topic in nuclear astrophysics. For typical superbursts, the Gamow window energy of the $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction is 1.5 ± 0.3 MeV, significantly lower than the Coulomb barrier. This makes it a huge challenge to directly measure the extremely low cross section of the fusion reaction in the corresponding energy region.The experiment by the Trojan Horse Method (THM) is the only measurement providing the excitation functions for all exit channels within the Gamow window. However, the experimental results still remain highly controversial at present. This work reviews the current status of measurement experiments for the $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction and provides a novel interpretation of the data for THM. Combining the theory of identical boson systems, we discuss compound nuclear excited states in ^{24}Mg extracted from THM, and the S^* factor for the $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction within the Gamow window. Furthermore, the reduced-width amplitude for the entrance channel of the $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction within the Gamow window is suggested as θ^2=0.031.

Key words: Nuclear astrophysics; $^{12}C+^{12}C$ fusion reaction; Trojan Horse Method; Astrophysical S^* factor

---

Received date: 2024-05-27; **Revised date**: 2024-mm-dd

Fundation item: the National Key Research and Development Project (No. 2022YFA1602301); the National Natural Science Foundation of China (Nos. U2267205, 12275361);

† **Corresponding author**: WANG Youbao, E-mail: ybwang@ciae.ac.cn.
LIU Weiping, E-mail: liuwp@sustech.edu.cn